

# CALOR Y TEMPERATURA

---

1. Introducción
  2. Equilibrio térmico y temperatura
  3. Gases ideales
  4. Dilatación térmica
  5. Calorimetría
  6. Propagación del calor
- 

## 1.- INTRODUCCIÓN

En este tema y en el siguiente desarrollaremos algunas de las ideas que constituyen las bases de la **Termodinámica** y, en particular, en este tema introduciremos los conceptos de **calor** y **temperatura**.

La Termodinámica es la parte de la Física que se dedica al estudio de las transformaciones de energía donde intervienen calor, trabajo mecánico y otros aspectos de la energía, así como la relación que existe entre transformaciones y las propiedades de la materia.

Inicialmente la Termodinámica surgió del estudio de la producción de trabajo mecánico a partir de fuentes de calor y su interés se centró en las aplicaciones técnicas de las máquinas térmicas. Sin embargo, hoy en día la Termodinámica interviene con amplitud en dominios de la Física (fenómenos superficiales, pilas, magnetismo), de la Química (reacciones químicas, equilibrios), de la Ingeniería (refrigeración, turbinas, motores), de la Biología (fenómenos bioenergéticos), de la Meteorología (humedad, predicción del tiempo), etc. Desde un punto de vista histórico, la Termodinámica se desarrolló durante los siglos XVIII y XIX cuando las nociones de calor y temperatura no se comprendían completamente. Evolucionó hasta constituir una teoría formal y elegante cuyos resultados y métodos llegaron a ser extremadamente importantes para fines de ingeniería. Debido a que más o menos por aquella época se desarrollaron las máquinas de vapor.

Puede decirse que la Termodinámica clásica estudia aquellos fenómenos físicos macroscópicos relacionados con el calor y la temperatura. limitándose al estudio de los **estados de equilibrio** y a las transformaciones que pueden representarse por una serie continua de estados de equilibrio.

Una muestra de sustancia, tanto si es sólida, líquida o gaseosa. Puede describirse de dos formas básicas:

(a) En función de los átomos y moléculas que la constituyen, de las interacciones entre estos componentes y de los límites impuestos por la forma de la muestra o del recinto que la contiene. Esta descripción recibe el nombre de **microscópica** y su estudio corresponde a la Teoría Cinética y a la Mecánica Estadística.

(b) En función de las propiedades macroscópicas de la muestra, que pueden determinarse por medidas prácticas; estas medidas sólo detectan valores medios de las coordenadas atómicas de las partículas. Tales son la masa, el volumen, la densidad, la presión, la temperatura, el calor específico, la constante dieléctrica, los módulos de elasticidad, etc. Este tipo de descripción, característica de la Termodinámica, recibe el nombre de **macroscópica**.

La Termodinámica es, pues, una disciplina “fenomenológica”, que estudia los fenómenos que ocurren en los sistemas desde un punto de vista macroscópico en función de las propiedades físicas observables y medibles. Por ello, no realiza ninguna hipótesis sobre la constitución íntima de la materia y sus principios son independientes de una imagen molecular. La validez de sus ecuaciones descansa en la creencia de que los fenómenos físicos cumplen hoy, y seguirán cumpliendo siempre, los llamados **principios termodinámicos**, extraídos de nuestra experiencia en el mundo macroscópico en que vivimos.

Algunas de las magnitudes macroscópicas que se utilizan en Termodinámica son la *presión*,  $p$ , de un gas o fuerza por unidad de área que ejerce el gas sobre una superficie, el *volumen*,  $V$ , de ese gas o el *número de moles*,  $n$ , que especifica la cantidad de gas. Otras magnitudes macroscópicas son la *temperatura*,  $T$ , la *energía interna*,  $U$  y la *entropía*,  $S$ . Estas propiedades caracterizan al sistema, de modo que el estado de un sistema termodinámico se describe mediante los valores que poseen dichas magnitudes.

## 2.- EQUILIBRIO TÉRMICO Y TEMPERATURA

### 2.1.- Equilibrio térmico

El estado de equilibrio de un sistema físico depende de la proximidad de otros sistemas y de la naturaleza de la superficie que les separa. Si esta superficie es buena conductora del calor, la experiencia nos dice que el sistema modifica su estado hasta alcanzar un nuevo equilibrio: se trata de una superficie **diatérmica**. Por ejemplo, si se aproxima un vaso metálico que contiene una mezcla de agua con hielo a un radiador eléctrico se observa como

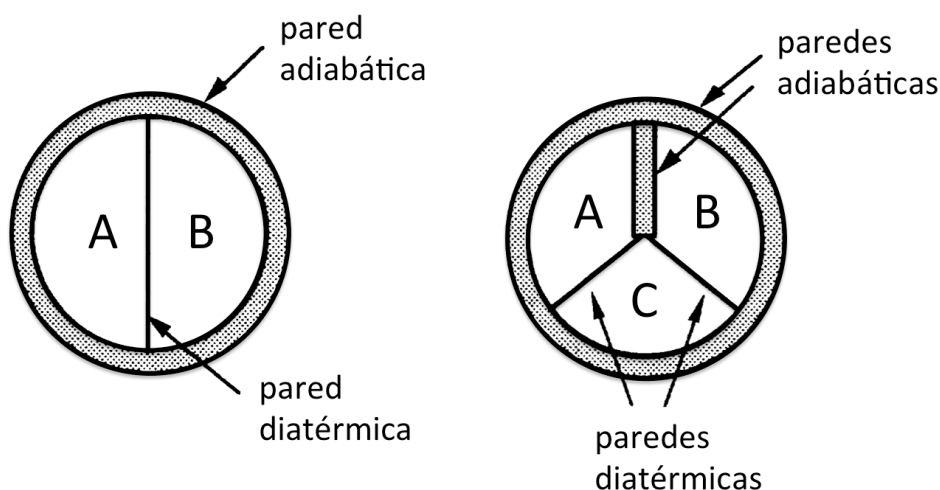
el hielo se funde. La pared del vaso es una pared diatérmica. En cambio, si la superficie de separación está formada por una sustancia mala conductora, el equilibrio del sistema no se modifica y la superficie es **adiabática**. Es lo que ocurre si la mezcla de agua con hielo está encerrada en un vaso Dewar de dobles paredes con vacío entre ambas.

Admitimos que todo sistema **no en equilibrio** sometido a condiciones exteriores constantes alcanza finalmente un estado de equilibrio (*postulado de existencia del equilibrio termodinámico*).

## 2.2.- Principio cero de la Termodinámica

Cuando un sistema A está en contacto prolongado con un sistema B a través de una pared diatérmica, se dice que los dos sistemas están en contacto “térmico”. Sus variables termodinámicas se modifican espontáneamente y cuando esta evolución se detiene se dice que los sistemas han alcanzado “el equilibrio térmico”.

Supongamos que tenemos ahora tres sistemas A, B y C como se muestra en la figura, de modo que A y B están separados mediante una pared adiabática, pero ambos están en contacto térmico con el sistema C a través de una pared diatérmica. Por tanto A y B están en equilibrio térmico con C. La experiencia nos dice que entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.



Estos resultados constituyen el llamado **principio cero de la Termodinámica**, que puede enunciarse del siguiente modo:

(a) Dos sistemas aislados, A y B, puestos en contacto prolongado alcanzan el equilibrio térmico.

(b) Si dos sistemas A y B separadamente están en equilibrio térmico con un tercero, C, están también en equilibrio térmico entre sí (*propiedad transitiva*).

El concepto de **temperatura** está íntimamente relacionado con el estado de equilibrio térmico entre dos sistemas. Así, dos sistemas en equilibrio térmico tienen la misma temperatura. Si dos sistemas se ponen en contacto y, al hacerlo, sus variables termodinámicas comienzan a cambiar, entonces los sistemas no estaban a la misma temperatura; sin embargo, llegarán a estar a una temperatura común cuando se alcance el equilibrio térmico. El principio cero es la base de las medidas termométricas. Dos cuerpos A y B están a igual temperatura cuando puestos por separado en contacto con un termómetro C, éste indica valores iguales en su escala.

### **2.3.- Temperatura, termómetros y escala de temperaturas del gas ideal**

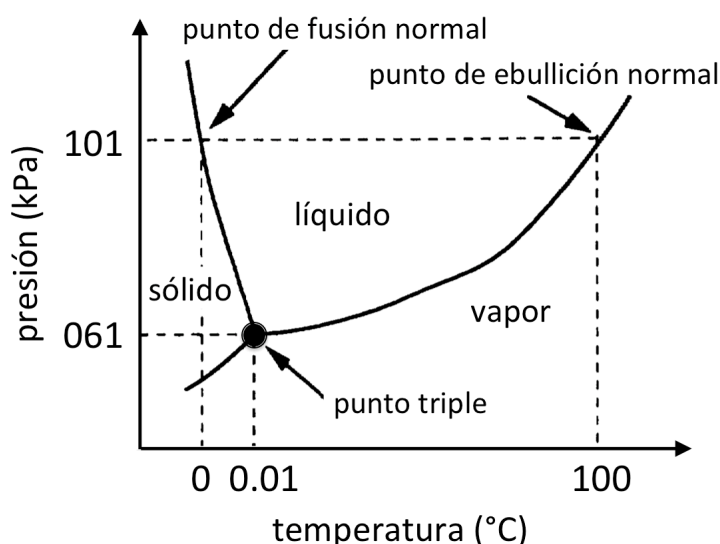
La temperatura se describe subjetivamente en términos tales como “caliente” y “frío”, de modo que “caliente” corresponde a una temperatura más alta que “frío”. Sin embargo, estos términos no tienen un significado objetivo consistente: Podemos apreciar variaciones de temperatura de acuerdo con las variaciones de intensidad de estas sensaciones, pero el sentido del tacto carece de sensibilidad y alcance necesarios para dar una forma cuantitativa de esta magnitud.

Las variaciones de temperatura de un cuerpo van casi siempre acompañadas de una variación de las magnitudes observables o macroscópicas que caracterizan el estado de dicho cuerpo. Así ocurre, por ejemplo, con la longitud de una columna líquida o de un alambre, la resistencia eléctrica de un metal, la presión (o el volumen) de un gas a volumen (o presión) constante, etc. Teniendo esto en cuenta, podemos decir que:

*“Un **termómetro** es cualquier dispositivo o sistema que se utiliza para conectar el valor de una de sus variables observables con la temperatura”.*

Un termómetro deberá tener algunas características importantes. La propiedad que los caracterice (longitud, presión, resistencia, etc.) deberá variar con la temperatura de una manera fácilmente medible. Sus indicaciones deberán ser reproducibles y su construcción debe ser tal que pueda duplicarse fácilmente. La sensibilidad de sus indicaciones no deberá depender del tipo de material utilizado en su construcción, y deberá ser capaz de medir temperaturas en un margen amplio.

Para definir una **escala termométrica**,  $T$ , se elige una función termométrica,  $x$ , normalmente lineal  $T = ax + b$ . La pendiente  $a$  y la ordenada en el origen  $b$  pueden determinarse definiendo arbitrariamente la temperatura de dos estados reproducibles de algún sistema patrón. Otra posibilidad es elegir  $b = 0$  y determinar  $a$  definiendo arbitrariamente la temperatura de un solo estado patrón y entonces  $T = ax$ . Por convenio, se elige el **punto triple del agua** como dicho estado patrón. En este punto coexisten en equilibrio el *hielo*, el *agua líquida* y el *vapor de agua* y este equilibrio se verifica a una presión de 4.58 Torr (610 Pa) y a una temperatura determinada. Arbitrariamente se le atribuye la temperatura de 273.16 K (kelvin) que corresponde a una temperatura de 0.010° C en la escala familiar de grados centígrados. Por tanto el kelvin, unidad de temperatura en el S.I., es la fracción  $1/273.16$  de la temperatura del punto triple del agua.



Con este criterio, si  $x$  es la variable termométrica, la temperatura  $T$  correspondiente está relacionada con  $x$  mediante la relación  $T = ax$ . Llamando  $x_3$  al valor de  $x$  a la temperatura del punto triple del agua, se cumplirá:

$$a = \frac{273.16}{x_3}$$

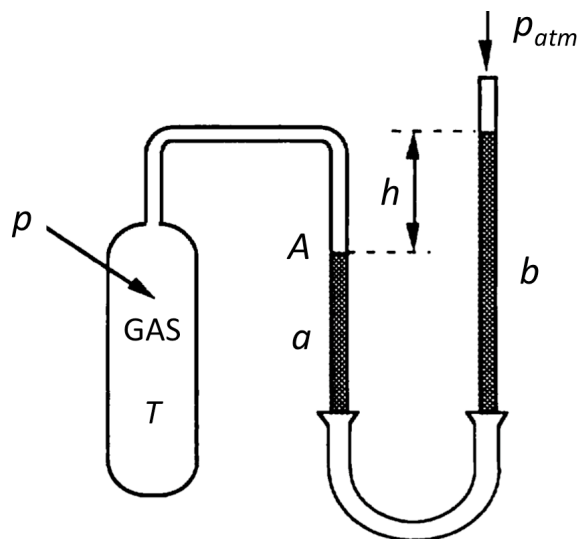
y, por tanto, para cualquier otra temperatura:

$$T = 273.16 \frac{x}{x_3}$$

ecuación que define perfectamente la escala de temperatura.

Ejemplos de termómetros son el **termómetro de mercurio** (ya en prohibidos) en el cual la **magnitud termométrica**  $x$  es la longitud de una columna de mercurio dentro de un capilar de vidrio. El **termopar**, que consiste en dos empalmes de dos alambres de metales diferentes. Si uno de los empalmes (o soldaduras) se mantiene a una temperatura de referencia (como un baño de agua y hielo) y el otro a otra temperatura distinta, existirá una diferencia de potencial entre ambos empalmes. Esta diferencia de potencial se utiliza para medir la temperatura. Otro termómetro eléctrico es el **termómetro de resistencia**, basado en que la resistencia eléctrica de un conductor (el termómetro) varía con la temperatura.

Se elige como termómetro patrón el **termómetro de gas a volumen constante**, operando en condiciones tales que el resultado de la medida sea independiente del gas elegido (**gas ideal**). Consta de una cámara que contiene un gas y de un mecanismo para asegurar que el volumen ocupado por el gas permanezca constante. En él se mide la presión, y ésta sirve para determinar la temperatura, eligiendo que la temperatura sea proporcional a la presión del gas.



El volumen del gas se mantiene constante ajustando el mercurio de modo que la parte superior de la columna  $a$  esté siempre en un mismo punto capilar  $A$ . La presión se mide observando la diferencia de alturas  $h$  entre las columnas  $a$  y  $b$ , de modo que:

$$p = p_{atm} + \rho gh$$

donde  $\rho$  es la densidad del mercurio y  $g$  la aceleración de la gravedad.

Si  $p_3$  es la presión del recinto que contiene el gas cuando éste se encuentra a la temperatura del punto triple, la temperatura  $T$  vendrá dada por la expresión:

$$T = 273.16 \frac{p}{p_3}$$

siendo  $p$  la presión medida.

Cuanto menor es la presión del gas, la temperatura es más baja, de modo que cuando  $p$  tiende a cero,  $T$  también tiende a cero, el **cero absoluto de temperatura**.

El gas más útil para este tipo de termómetros es el helio, que permanece gaseoso a las más bajas temperaturas, aunque también suele utilizarse hidrógeno. Las temperaturas así definidas se llaman **temperaturas absolutas** o **del gas ideal**, pues prácticamente coinciden con las definidas mediante el gas ideal, en el que se verifica  $T / T_0 = p / p_0$ .

Otras escalas de temperatura son las siguientes:

(a) **Escala Celsius** o centígrada,  $t_C$ , en la que la temperatura del punto de fusión normal del agua corresponde a  $0^\circ \text{ C}$  y la del punto de ebullición normal a  $100^\circ \text{ C}$ . Podemos escribir:

$$t_C = T - 273.15$$

(b) **Escala Fahrenheit**,  $t_F$ , en la que la temperatura del punto de fusión normal del agua corresponde a  $32^\circ \text{ F}$ , y la del punto de ebullición normal a  $212^\circ \text{ F}$ . Podemos escribir:

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32$$
$$t_C = \frac{5}{9} (t_F + 32)$$

(c) **Escala Réaumur**,  $t_R$ , en la que la temperatura del punto de fusión normal del agua corresponde a  $0^\circ \text{ R}$  y la del punto de ebullición normal a  $80^\circ \text{ R}$ , de modo que:

$$t_R = \frac{4}{5} t_C$$

### 3.- GASES IDEALES

#### 3.1.- Ecuación de estado de los gases ideales

Las condiciones en que existe un material dado se describen con cantidades físicas como presión ( $p$ ), volumen ( $V$ ), temperatura ( $T$ ) y cantidad de sustancia ( $n$ ). Estas variables describen el estado del material y se llaman *variables de estado*.

El *gas ideal* es un modelo idealizado que funciona mejor a presiones muy bajas y altas temperaturas, cuando las moléculas del gas están muy separadas y en rápido movimiento. La *ecuación de los gases ideales* es:

$$pV = nRT$$

donde  $p$  es la presión,  $V$  el volumen,  $n$  el número de moles,  $T$  la temperatura absoluta y  $R$  la constante de los gases ideales, cuyo valor numérico depende de las unidades del resto de magnitudes físicas que aparecen en la ecuación. En unidades del SI con  $p$  en Pa,  $V$  en  $\text{m}^3$ ,  $n$  en mol y  $T$  en K:

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

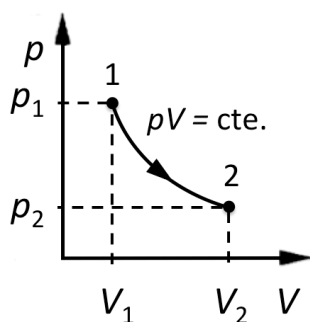
Si  $p$  se expresa en atmósferas (atm) y  $V$  en litros (L), entonces la constante de los gases ideales se expresa en la forma:

$$R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

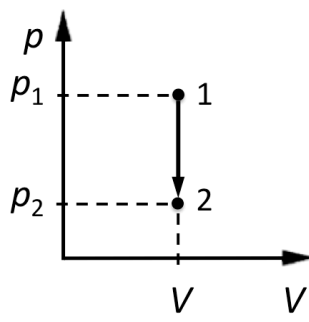
Para una cantidad fija de gas ( $n = \text{constante}$ ) y dos estados 1 y 2, se cumple:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

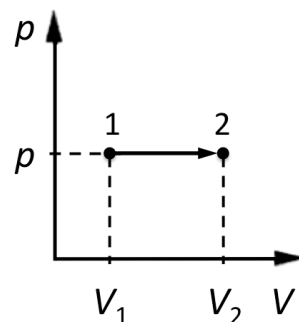
Vamos a considerar los casos a temperatura constante (*isotermo*), volumen constante (*isócoro*) y presión constante (*isóbaro*).



ISOTERMO



ISÓCORO



ISÓBARO

### 3.2.- Ley de Boyle-Mariotte

Para un proceso *isotermo*, es decir, a temperatura constante ( $T = \text{constante}$ ) y para una cantidad fija de gas ( $n = \text{constante}$ ), se cumple:

$$pV = \text{constante}$$

que escrita para dos estados 1 y 2 toma la forma:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

que es la *ley de Boyle-Mariotte*.



### 3.3.- Ley de Gay-Lussac

Para un proceso *isócoro*, es decir, a volumen constante ( $V = \text{constante}$ ) y para una cantidad fija de gas ( $n = \text{constante}$ ), se cumple:

$$\frac{p}{T} = \text{constante}$$

que escrita para dos estados 1 y 2 toma la forma:

$$\boxed{\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}}$$

que es la *ley de Gay-Lussac*.

### 3.4.- Ley de Charles

Para un proceso *isóbaro*, es decir, a presión constante ( $P = \text{constante}$ ) y para una cantidad fija de gas ( $n = \text{constante}$ ), se cumple:

$$\frac{V}{T} = \text{constante}$$

que escrita para dos estados 1 y 2 toma la forma:

$$\boxed{\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}}$$

que es la *ley de Charles*.

## 4.- DILATACIÓN TÉRMICA

La mayoría de las sustancias se expanden o dilatan al aumentar la temperatura y se contraen cuando ésta disminuye.

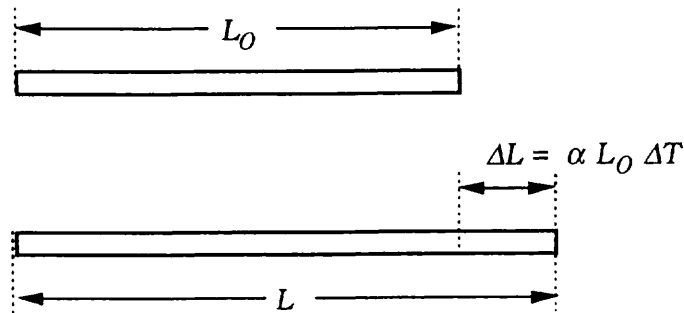
### 4.1.- Dilatación lineal

Consideremos una barra cuya longitud  $L_0$  a una temperatura  $T_0$  pasa a ser  $L$  a otra temperatura  $T$ . La variación  $\Delta L = L - L_0$  es el cambio de longitud de la barra debido al cambio de temperatura. Experimentalmente se encuentra

que  $\Delta L$  es proporcional al cambio de temperatura  $\Delta T = T - T_0$  y a la longitud inicial de la barra  $L_0$ . Esto es:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

siendo  $\alpha$  una constante de proporcionalidad, distinta para cada sustancia, que se denomina **coeficiente de dilatación lineal**.



De la ecuación anterior podemos escribir:

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$$

y también:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T}$$

y en el límite cuando  $T$  tiende a cero, entonces:

$$\alpha = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT}$$

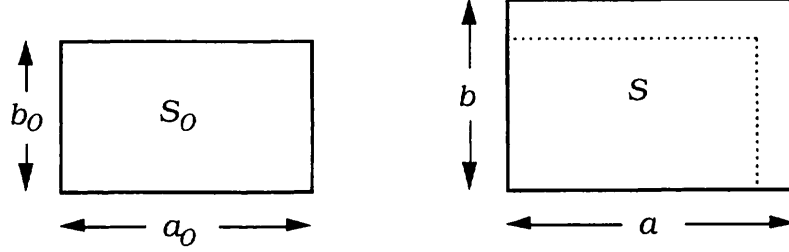
Por ejemplo, para el aluminio  $\alpha = 2.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  y para el hormigón  $\alpha = 0.7 - 1.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

#### 4.2.- Dilatación superficial

Cuando se calienta una lámina de material, aumenta tanto su longitud como su anchura. Consideremos una lámina rectangular de lados  $a_0$  y  $b_0$  a la temperatura  $T_0$ . Si se calienta a la temperatura  $T$ , estas dimensiones se convierten en:

$$a = a_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$b = b_0(1 + \alpha\Delta T)$$



Si el área inicial de la lámina era  $S_0 = a_0 b_0$ , su área después de calentada será:

$$S = ab = a_0 b_0 (1 + \alpha\Delta T)(1 + \alpha\Delta T) = S_0 [1 + 2\alpha\Delta T + (\alpha\Delta T)^2]$$

Como  $\alpha$  tiene un valor pequeño,  $\alpha^2$  aún será más pequeño y el término  $(\alpha\Delta T)^2$  puede despreciarse. Por tanto:

$$S = S_0(1 + 2\alpha\Delta T)$$

Si definimos el coeficiente de dilatación superficial  $\gamma$  tal que:

$$S = S_0(1 + \gamma\Delta T)$$

se deduce que  $\gamma = 2\alpha$ . También podemos calcular  $\gamma$  mediante:

$$\gamma = \frac{1}{S_0} \frac{dS}{dT}$$

Aunque este resultado se ha deducido para el caso especial de una lámina rectangular, sigue cumpliéndose para una lámina de forma cualquiera.

#### 4.3.- Dilatación cúbica o volumétrica

Considerando un bloque macizo de sustancia que tenga forma de paralelepípedo recto de aristas  $a_0$ ,  $b_0$  y  $c_0$  a la temperatura  $T_0$ , es fácil demostrar por un razonamiento análogo al anterior que:

$$V = V_0(1 + 3\alpha\Delta T)$$

siendo  $V$  el volumen a la temperatura  $T$  y  $V_0$  el volumen a la temperatura  $T_0$ . Además  $\beta = 3\alpha$  es el **coeficiente de dilatación cúbica** o **volumétrica** de la sustancia, de modo que:

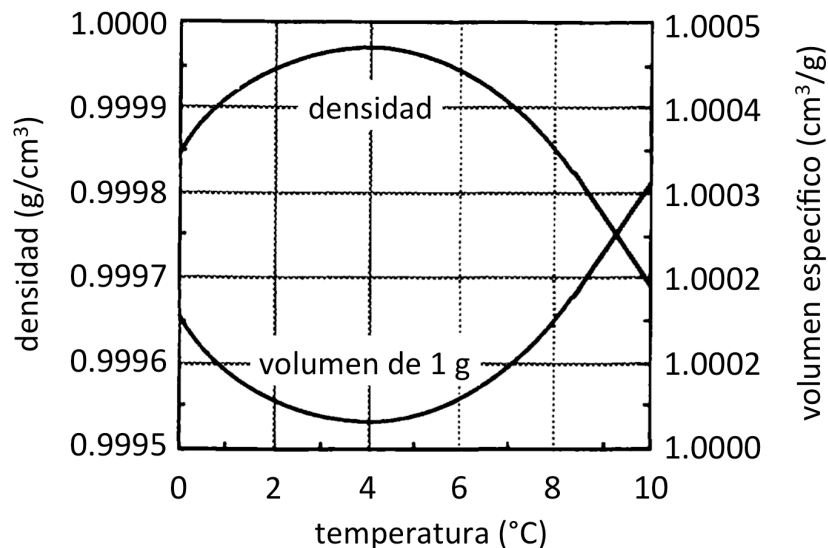
$$V = V_0(1 + \beta\Delta T)$$

Esta ecuación se cumple independientemente de la forma del cuerpo. También podemos definir el coeficiente de dilatación cúbica mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT}$$

Por ejemplo, para el mercurio  $\beta = 18 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  y para el metanol  $\beta = 112 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

El agua, como puede verse en la siguiente figura, presenta una situación anómala, pues en el intervalo de temperaturas comprendido entre  $0^\circ\text{C}$  y  $4^\circ\text{C}$  **disminuye** el volumen al crecer la temperatura, comportamiento contrario al de la mayor parte de las sustancias. Esto es, entre  $0^\circ\text{C}$  y  $4^\circ\text{C}$  el coeficiente de dilatación del agua es *negativo*. Por encima de los  $4^\circ\text{C}$  el agua se dilata cuando se calienta. Como el volumen de una masa dada de agua es más pequeño a  $4^\circ\text{C}$  que a cualquier otra temperatura, la densidad del agua es máxima a  $4^\circ\text{C}$ . A esta propiedad del agua se debe el que los lagos y estanques se hielan primero por su superficie libre, pues el hielo debido a su menor densidad se sitúa en la superficie libre del líquido y aísla el resto del agua de nuevas pérdidas caloríficas. La *expansión térmica anómala del agua* se debe a la interacción de las moléculas del agua, que posee una forma inusual.



## 5.- CALORIMETRÍA

La energía transferida a través de los límites de un sistema debido a una diferencia de temperaturas, constituye el **calor**. En esta definición viene implícito el hecho importante de que un cuerpo no contiene calor, sino que sólo denominamos con este nombre la energía en tanto cruza los límites. Es decir, el calor es un fenómeno transitorio. Si consideramos el cuerpo caliente como un sistema y el frío como otro. Llegamos a la conclusión de que originalmente ni uno ni otro contienen calor (contienen energía. desde luego). Al poner ambos sistemas en comunicación térmica el calor se transfiere del cuerpo caliente al frío hasta que se establece el equilibrio térmico. La temperatura es como un potencial que gobierna el paso de calor.

Puesto que el calor es una forma de energía, debe medirse en unidades energética. y. por tanto, en Julios en el S.I. Una unidad práctica del calor es la caloría (cal), que vale:

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

Fue Joule el que encontró este equivalente mecánico del calor, en un dispositivo formado por un calorímetro lleno de agua y en cuyo interior había una paletas conectadas a un eje que giraba mediante un mecanismo formado por una masa  $m$  unida a un hilo. Si inicialmente la masa está en reposo, al bajar una altura  $h$  disminuye su energía potencial en un valor  $mgh$ , aumenta su energía cinética en  $\frac{1}{2}mv^2$  y comprobó que también aumentaba la temperatura del agua en un valor  $\Delta T$  debido a que pasa energía calorífica al agua a causa de la fricción de las paletas con el agua. Se cumplirá:

$$mgh - \frac{1}{2}mv^2 = J M \Delta T$$

donde  $M$  es la masa del agua contenida en el calorímetro y  $J$  es el **equivalente mecánico del calor**, cuyo valor es  $J = 4.186 \text{ J/cal}$ .

### 5.1.- Capacidad calorífica y calor específico

Si se mete una cucharita fría en una taza de café caliente, la cuchara se calienta y el café se enfría para acercarse al equilibrio térmico. La interacción que causa estos cambios en la temperatura es básicamente una transferencia de energía de una sustancia a otra. La transferencia de energía que se da exclusivamente por una diferencia de temperatura se llama *flujo de calor* o *transferencia de calor*, y al energía transferida se llama *calor*. Usamos el símbolo  $Q$  para la cantidad de calor.

La **caloría** es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5°C a 15.5°C. La relación entre el **julio** y la **caloría** es:

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 0.24 \text{ cal}$$

Consideremos un sistema formado por un cuerpo homogéneo. al cual se entrega una cierta cantidad de calor  $dQ$ . La experiencia nos dice que, en ausencia de cambios de fase. la temperatura del cuerpo se modifica en un valor  $dT$ . Teniendo esto en cuenta. se denomina **capacidad calorífica molar**,  $C$ , a una magnitud física relacionada con  $dQ$  y  $dT$  mediante las ecuaciones:

$$dQ = n C dT \quad C = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT} \quad Q = n C \Delta T = n C (T_f - T_i)$$

donde  $dQ/dT$  no puede interpretarse como la derivada de  $Q$  respecto de  $T$ , ya que  $Q$  no es una propiedad del sistema y, por tanto,  $Q \neq f(T)$ . La notación  $dQ$  representa simplemente que una pequeña cantidad de calor  $dQ$  ocasiona el cambio de temperatura  $dT$ . Por otra parte,  $C$ , que es la *capacidad calorífica molar*, en el S.I. se mide en  $\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

Normalmente el proceso no viene definido completamente por la variación de la temperatura. sino que es necesario conocer otras magnitudes macroscópicas. Los procesos principales son a presión constante y a volumen constante.

En un sistema  $pVT$  la **capacidad calorífica a presión constante**,  $C_p$ , verifica la ecuación:

$$dQ = n C_p dT \quad C_p = \frac{1}{n} \left( \frac{dQ}{dT} \right)_{p=cte} \quad Q = n C_p \Delta T = n C_p (T_f - T_i)$$

Del mismo modo, la **capacidad calorífica a volumen constante**,  $C_v$ , cumplirá:

$$dQ = n C_v dT \quad C_v = \frac{1}{n} \left( \frac{dQ}{dT} \right)_{V=cte} \quad Q = n C_v \Delta T = n C_v (T_f - T_i)$$

Si lo que se considera es la masa  $m$  del sistema, tenemos el **calor específico**,  $c$ , que en el caso de sólidos y líquidos suele ser en condiciones de presión constante:

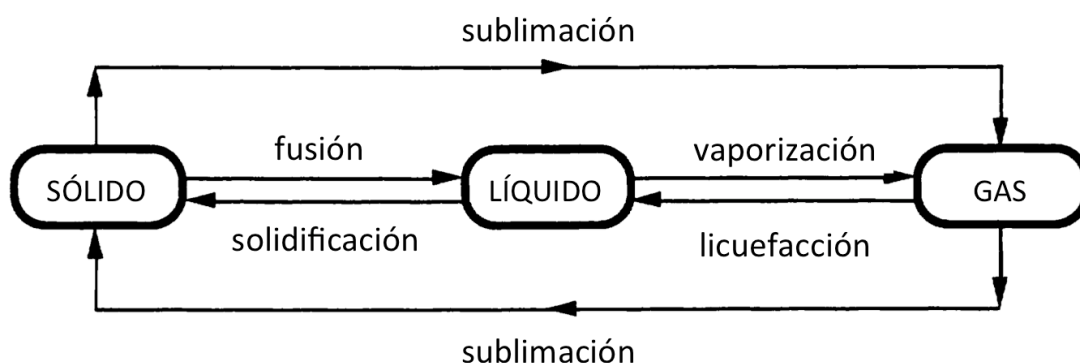
$$dQ = m c dT \quad c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad Q = m c \Delta T = m c (T_f - T_i)$$

En el S.I. los calores específicos se miden en  $\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$ . Para el agua el calor específico (a presión constante) es  $c = 1 \text{ cal} / \text{g} \cdot ^\circ\text{C}$  o bien  $4186 \text{ J} / \text{kg} \cdot \text{K}$ .

## 5.2.- Cambio de estado y calor latente

Cuando se aporta calor a una sustancia puede producirse un efecto importante y es el denominado **cambio de estado** o **cambio de fase**. Al variar su temperatura por dicha aportación de calor, se pueden modificar de forma importante las distancias entre sus moléculas, al producirse la variación. En mayor o menor grado, de las fuerzas de cohesión que las mantienen unidas, dando lugar a que estas moléculas adquieran una nueva distribución y, por tanto, un nuevo estado. Casi la totalidad de las sustancias conocidas pueden presentarse en tres estados diferentes: sólido, líquido y gaseoso.

Las denominaciones de los pasos de uno a otro estado aparecen en el siguiente diagrama:

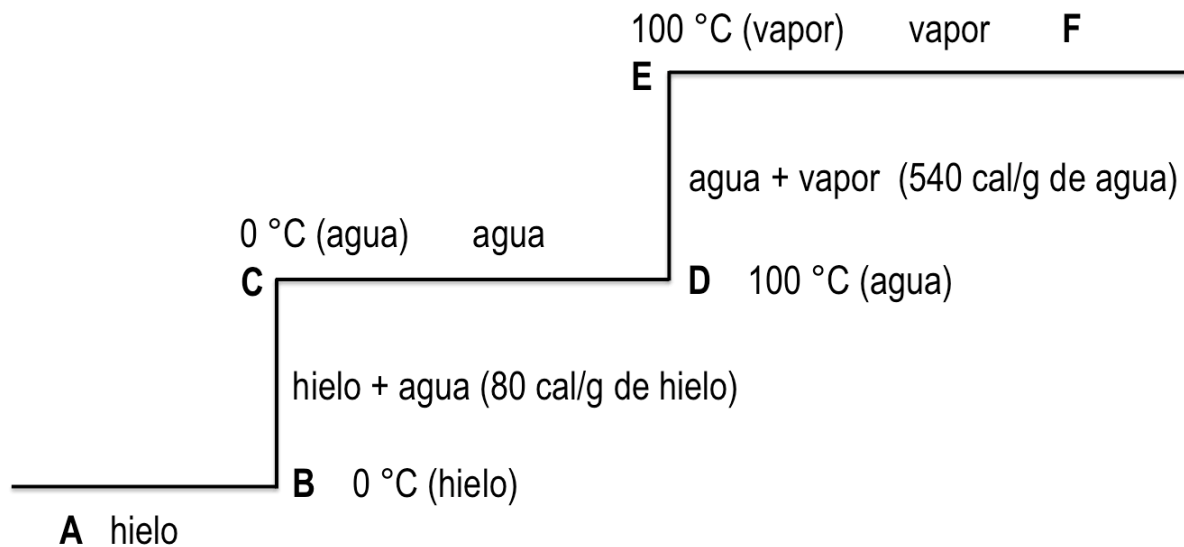


Prácticamente todos los cambios de estado se rigen por unas mismas leyes que se pueden sintetizar en:

(a) En igualdad de condiciones, todo cambio de estado se produce siempre a una temperatura determinada.

(b) Mientras se está produciendo un cambio de estado, cediendo o absorbiéndose calor, no varía la temperatura del sistema.

El proceso de los sucesivos cambios de estado que puede sufrir una sustancia queda descrito en el esquema de la siguiente figura. Aunque este diagrama está aplicado al caso del agua a presión atmosférica, es asimismo válido para cualquier sustancia, con el consiguiente cambio de valores.



En el punto **A** se tiene hielo. Al ir dándole calor, su temperatura sube hasta 0 °C (punto **B**); al seguir calentando se observa que la temperatura se mantiene constante, pero el hielo empieza a fundirse, pasando al estado de agua, produciéndose la **fusión**. Cuando todo el sistema ha pasado al estado de agua líquida, en el punto **C**, al aportarle calor, su temperatura aumenta hasta llegar a 10 °C. En el punto **D** la temperatura no sube más, pero empieza a aparecer vapor de agua, produciéndose el paso de **vaporización**. En el punto **E** todo el sistema se encuentra en forma de vapor, permaneciendo en este estadio al aportar calor al sistema, pero aumentando la temperatura.

El calor necesario para fundir una sustancia sólida es:

$$Q_f = m L_f$$

donde  $L_f$  es el **calor latente de fusión**. Para el agua a presión atmosférica  $L_f = 333.5 \text{ kJ/kg} = 80 \text{ cal/g}$ .

El calor necesario para vaporizar un líquido es:

$$Q_v = m L_v$$

donde  $L_v$  es el **calor latente de vaporización**. Para el agua a presión atmosférica  $L_v = 2257 \text{ kJ/kg} = 540 \text{ cal/g}$ .

En igualdad de condiciones todo cambio de fase se produce a una temperatura determinada, y **la temperatura del sistema no varía mientras se está produciendo un cambio de fase**.



## 6.- PROPAGACIÓN DEL CALOR

Si queremos aumentar la temperatura de un frasco de agua el procedimiento que utilizamos es “calentarlo”, colocándolo sobre una llama o dejando caer un objeto caliente dentro del agua. En uno y otro caso se produce una transferencia de energía al agua, y esta transferencia de energía ocurre debido a que hay una diferencia de temperatura entre el agua y alguno de sus alrededores. Esta observación constituye la base para una definición de calor. *Calor es la energía transferida entre un sistema y su entorno debida únicamente a una diferencia de temperatura entre dicho sistema y alguna parte de su entorno.*

Esa transferencia o propagación del calor entre un sistema y su entorno o entre dos sistemas puede llevarse a cabo mediante tres mecanismos diferentes: *conducción, convección y radiación.*

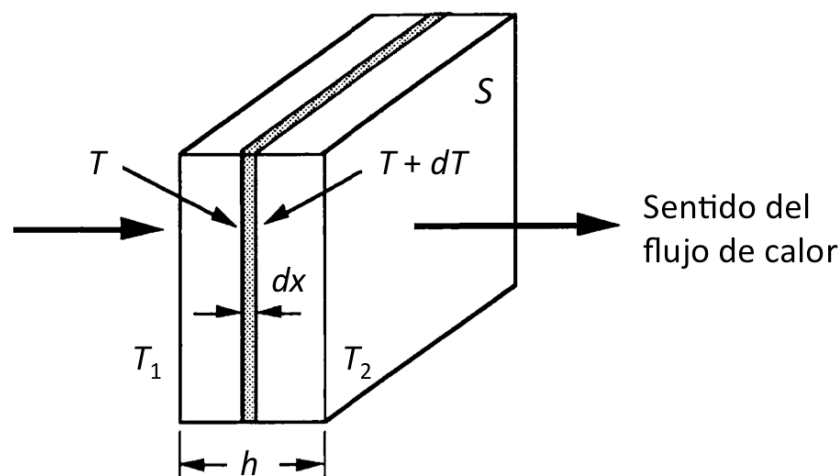
Calentando una porción de un cuerpo podremos comprobar que al cabo de un tiempo la temperatura del resto del cuerpo ha aumentado. El calor se ha propagado a través de la materia, estando en reposo dichos cuerpos. En este caso se dice que el calor se ha propagado por **conducción** y no ha habido desplazamiento de materia.

Si se calienta la parte inferior de un fluido comprobaremos que la temperatura en los puntos de su parte superior va aumentando. Pero ahora el fluido no está en reposo estableciéndose una corriente ascendente y otra descendente a causa de las variaciones de densidad con la temperatura. En este caso se dice que el calor se propaga por **convección** y este tipo de propagación se realiza por transporte de materia. Finalmente, dos cuerpos a temperaturas diferentes, separados y en el vacío, también llegan a igualar sus temperaturas sin que pueda hablarse de conducción ni de convección por no tener interpuesto ningún medio material. Se dice que en este caso el calor se propaga por **radiación**, y la transmisión del calor se lleva a cabo por medio de ondas electromagnéticas.

### 6.1.- Propagación del calor por conducción

Vamos a considerar la **conducción del calor a través de una pared plana sin pérdidas laterales y en estado estacionario**. Para ello consideremos una placa como la que se muestra en la siguiente figura cuyas caras extremas están a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  constantes. Si  $T_1 > T_2$  hay un flujo de energía calorífica de la cara 1 a la cara 2. Si las dos temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  se mantienen estacionarias (constantes en el tiempo), la cantidad de calor que entra por una cara es igual a la que sale por la otra. las temperaturas en

los distintos puntos de la pared serán estacionarias y dependerán de la distancia a una de las caras.



Si el medio es homogéneo e isótropo, el calor se propaga perpendicularmente a las caras y no hay pérdidas laterales, es evidente que la temperatura en los distintos puntos de un plano paralelo a las caras debe ser la misma. Tomando en el interior de la pared una porción de caras planas, paralela a las caras, situada a una distancia  $x$  de la primera cara y cuyo espesor es  $dx$ . Si la temperatura a la distancia  $x$  es  $T$ , a la distancia  $x + dx$  será  $T + dT$ . Experimentalmente se demuestra que la cantidad de calor  $dQ$  que atraviesa el espacio comprendido entre  $x$  y  $x + dx$  en un intervalo de tiempo  $dt$  es directamente proporcional al área  $S$  de la sección recta de la placa y al gradiente de temperatura  $dT/dx$  entre los planos. Es decir:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -KS \frac{dT}{dx}$$

Esta ecuación recibe el nombre de **Ley de Fourier**. En ella  $K$  es una constante que recibe el nombre de **coeficiente de conductividad térmica**. En el S.I.  $K$  se mide el  $J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$  (las unidades del calor, como forma de energía, son las mismas que las de la energía, es decir, julios en el S.I., aunque también se utiliza la caloría:  $1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$ ). El signo menos indica que el sentido de propagación es contrario al gradiente, es decir, que va de la temperatura superior a la inferior.

En relación a los valores de  $K$ , para el aluminio  $K = 237$  mientras que para el hormigón  $K = 0.9-1.3$  y para el aire  $K = 0.02$ , todos ellos en  $J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$ .

Para obtener la distribución de temperaturas en la placa, teniendo en cuenta que el estado es estacionario y no hay pérdidas laterales, entonces el flujo de calor  $H = dQ/dt$  permanece constante, por lo que podemos escribir:

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{e integrando} \quad T = C_1 x + C_2$$

donde  $C_1$  y  $C_2$  son constantes de integración cuyos valores pueden deducirse sabiendo que para  $x = 0$  se tiene  $T = T_1$ , y para  $x = h$  (siendo  $h$  el espesor de la pared),  $T = T_2$ . Así resulta:

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{h} x$$

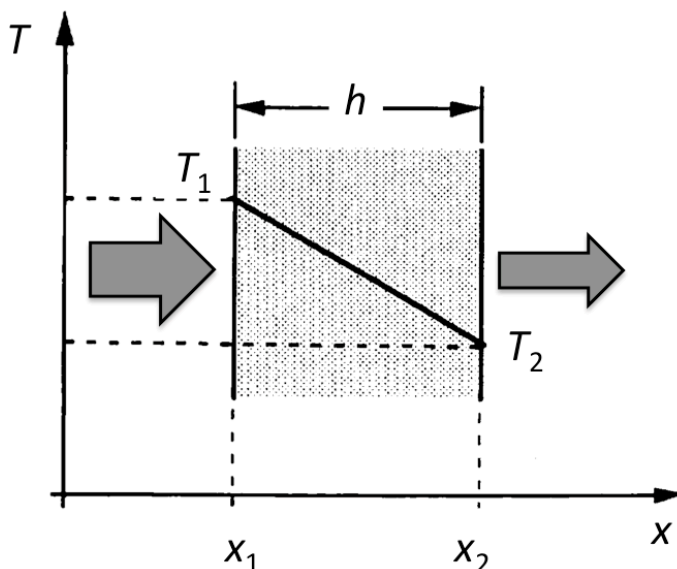
ecuación de una recta cuya pendiente  $(T_2 - T_1)/h$  aumentará con la diferencia de temperaturas que existe entre las superficies extremas de la pared. Derivando la ecuación anterior respecto a  $x$  y sustituyendo en la ecuación de  $H = dQ/dt$ , se obtiene:

$$H = \frac{dQ}{dT} = -KS \frac{T_2 - T_1}{h} = \frac{T_2 - T_1}{\frac{h}{KS}}$$

Expresión que puede compararse formalmente con la ley de Ohm  $I = V/R$  identificando  $dQ/dt$  con la intensidad  $I$  de la corriente, la diferencia de temperaturas  $T_2 - T_1$  con la diferencia de potencial  $V$  y el denominador  $h/KS$  con la resistencia  $R$ , e incluso se le da el nombre de **resistencia térmica** y a la ecuación anterior se le conoce como *ley de Ohm de la calorimetría*:

$$H = \frac{dQ}{dT} = \frac{T_2 - T_1}{R}$$

En el S.I., la resistencia térmica  $R$  se mide en  $J^{-1} s K$ , unidad que se denomina *ohmio térmico* o *fourier*.

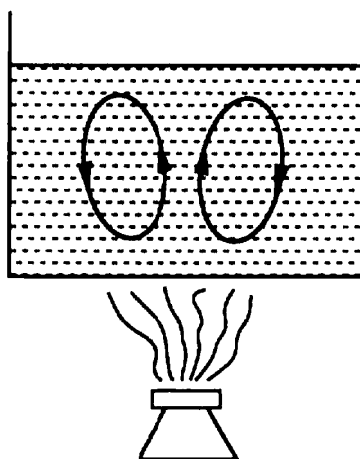


Flujo de calor a través de un muro y representación gráfica de la temperatura en función del espesor del mismo

## 6.2.- Propagación del calor por convección

La convección es un proceso mecánico de transporte de calor que tiene lugar exclusivamente en los fluidos y que consiste en una transferencia de calor de una a otra parte del fluido, gracias a corrientes originadas en su interior en virtud de diferencias de densidad. Estas corrientes reciben el nombre de **corrientes de convección**. Dichas corrientes pueden aparecer espontáneamente en fluidos cuya densidad varía con la temperatura y entonces el proceso se llama **convección natural** o **libre**. Así por ejemplo, en el aire, como consecuencia del campo gravitatorio terrestre. las corrientes de convección tienen lugar de tal forma que el aire de mayor temperatura (menor densidad) asciende, y el aire con menor temperatura (mayor densidad) desciende. Sin embargo, el movimiento del fluido también puede realizarse por causas externas, por ejemplo con el uso de un agitador, un ventilador, una bomba, etc., en cuyo caso el proceso se denomina **convección forzada**.

Un ejemplo sencillo en el que se observan corrientes de convección se muestra en la siguiente figura.



Al colocar un recipiente, por ejemplo con agua, las partículas que están en contacto con el manantial de calor se dilatan, aumentando su volumen y disminuyendo, por tanto, su densidad. Al ser su volumen mayor, el empuje que sufren debido a la masa líquida es mayor que su peso, haciéndolas subir hacia la superficie del líquido. Otras partículas frías bajan a ocupar su lugar, calentándose a continuación y subiendo a su vez, produciéndose las corrientes de convección indicadas en la figura, en la que las partículas calientes suben. se enfrían en la superficie y vuelven a bajar.

Las corrientes de convección en los líquidos tienen una aplicación práctica directa en las calderas de calefacción por agua caliente.

### 6.3.- Propagación del calor por radiación

Por radiación térmica se entiende la radiación electromagnética que emite la superficie de un cuerpo que ha sido excitado térmicamente. Esta radiación electromagnética se emite en todas direcciones. se propaga a la velocidad de la luz y cuando “choca” contra otro cuerpo puede ser reflejada, transmitida o absorbida por éste. Cuando la radiación es absorbida por el cuerpo incrementa su temperatura. Experimentalmente se ha observado que la facultad de absorber este tipo de energía es mayor en aquellos cuerpos que. a su vez. Al ser calentados, son capaces de emitir una gran cantidad de energía. Según esto, todo cuerpo capaz de absorber gran cantidad de energía es, igualmente, un buen emisor en la misma proporción que es capaz de absorberla. El cuerpo capaz de absorber toda la energía que llega a él, y que a su vez es capaz de emitir toda la energía que tiene, recibe el nombre de **cuerpo negro**.

La radiación térmica produce el mismo efecto que hubiera producido un flujo de calor por conducción o convección. La radiación térmica no exige medio de transporte alguno. propagándose incluso a través del vacío.

En el calor transferido por *radiación*, la potencia radiada  $P$  por una superficie viene dada por la **ley de Stefan-Boltzmann**:

$$P = e \sigma S T^4$$

donde  $e$  es la *emisividad* y  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  es la *constante de Stefan-Boltzmann*. Todos los objetos emiten energía desde sus superficies cuando están calientes y la radiación térmica es un tipo de radiación electromagnética.

En todos los mecanismos de propagación del calor, si la diferencia de temperatura entre el cuerpo y los alrededores es pequeña, la velocidad de enfriamiento del cuerpo es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura (*ley de enfriamiento de Newton*).

Es interesante comparar las velocidades asociadas con los tres mecanismos de propagación del calor. La radiación se propaga a la velocidad de la luz ( $\sim 10^8 \text{ m/s}$ ); la energía transportada por conducción se propaga a la velocidad del sonido ( $\sim 10^4 \text{ m/s}$ ) y la convección tiene lugar de un modo muy lento, semejante al transporte de un fluido ( $\sim 1 \text{ m/s}$ ).